

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОРОНАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Березин И.А.^{1,2}, Тлатов А.Г.^{1,2}

¹*Горная астрономическая станция ГАО, Кисловодск, Россия*

²*Калмыцкий государственный университет, Элиста, Россия*

MODELING THE SOLAR WIND SPEED BASED ON VARIOUS CORONAL MAGNETIC FIELD PARAMETERS

Berezin I.A.^{1,2}, Tlatov A.G.^{1,2}

¹*Kislovodsk mountain astronomical station of the Pulkovo observatory, Russia*

²*KalmSU, Elista, Russia*

The Wang-Shelley-Argé (WSA) model of the solar wind (SW) is based on the idea that weakly expanding coronal magnetic field tubes are associated with sources of fast SW and vice versa. A parameter called the flux tubes expansion (FTE) is used to determine the degree of expansion of magnetic tubes. The FTE is calculated based on the coronal magnetic field model, usually in the potential approximation. The second input parameter for the WSA model is the distance from the base of the magnetic field line in the photosphere to the edge of the corresponding coronal hole. These two coronal magnetic field parameters are related by an empirical relation to the solar wind velocity near the Sun. This approach does not fully explain the mechanisms of solar wind formation. We propose to use other magnetic field parameters for modeling the solar wind, such as the length of field lines, the absolute value of the magnetic flux at the wind source, the distance to the heliospheric current layer, and others. To reconstruct the magnetic field structure in the corona, we use both the potential approximation (the PFSS model) and some current approximations. We analyzed a number of possible parameters determining the solar wind velocity from observations at Kislovodsk (STOP), Stanford (WSO), and the SDO/HMI satellite. It was found that, by omitting the use of FTE, the correlation between the velocity of the modeled and observed SW is as good or better than that using the standard WSA model.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-21-24

Введение

В настоящее время принято считать, что механизмы формирования солнечного ветра (СВ) связаны со структурой крупномасштабного магнитного поля на фотосфере и в солнечной короне. Соответственно, исследования источников и механизмов ускорения СВ основываются на тех или иных моделях коронального магнитного поля. В качестве входных параметров в моделях солнечной короны используются синоптические карты, сформированные из наблюдений на магнитографах полного диска Солнца. Источниками невозмущённого солнечного ветра считаются корональные дыры (КД), которые соответствуют областям на фотосфере с открытой конфигурацией силовых линий магнитного поля. При этом открытыми

считаются силовые линии, достигающие поверхности источника – гипотетической сферической поверхности, радиус которой, как правило, принимается равным 2.5 радиусам Солнца ($R_{\odot}$).

Согласно модели Wang-Shelley-Argе (WSA), СВ распространяется из КД к поверхности источника по магнитным трубкам. При этом скорость СВ на поверхности источника зависит от степени расширения магнитных трубок – фактора расширения (ФР): $f_s = R_{\odot}^2 B_r(R_{\odot}) / (R_s^2 B_r(R_s))$, где $B_r(R_s)$ и $B_r(R_{\odot})$ – радиальные компоненты магнитного потока на поверхности источника и в основании магнитной трубки на фотосфере. Вторым параметром модели WSA, θ_b – расстояние от основания магнитной трубки на фотосфере до края соответствующей КД [1, 3]. Скорость СВ определяется из эмпирически найденного соотношения:

$$V(f_s, \theta_b) = 265 + \frac{1.5}{(1 + f_s)^{0.22}} (6.08 - 3.3 \exp(-(\theta_b/2.5)^{1.5}))^{3.4} \quad (1)$$

Модель WSA, хотя и является признанной, не лишена недостатков. Самая большая проблема – модель работает нестабильно и в некоторые периоды показывает отрицательную корреляцию с наблюдениями [2]. В этой работе мы исследуем связи наблюдаемой скорости СВ с различными параметрами магнитного поля, с целью использовать найденные закономерности в модели СВ.

Методы исследования и результаты

Расчёты параметров магнитного поля выполнялись в PFSS приближении и базировались на трёх рядах данных: СТОП (Кисловодск, 2014–2022 гг.); WSO (1974–2022 гг.); SDO/HMI (2010–2022 гг.). Кроме параметров модели WSA вычислялись также некоторые другие:

1. L – длина открытых силовых линий между фотосферой и поверхностью источника в единицах солнечного радиуса;
2. α_r – средний угол отклонения силовых линий от радиального направления на разных диапазонах высот, в градусах;
3. θ_{HCS} – кратчайшее угловое расстояние до гелиосферного токового слоя в градусах;
4. Абсолютные значения радиальных компонент магнитного потока на поверхности источника и в основании соответствующей трубки на фотосфере – $|Br(R_s)|$ и $|Br(R_{\odot})|$;
5. lat_{fp} – широта основания силовых линий на фотосфере, в градусах.

Все вышеперечисленные параметры вычислялись в плоскости эклиптики и сопоставлялись с наблюдаемой скоростью СВ, взятой из базы данных OMNI2. Для сопоставления наблюдаемая скорость СВ была пересчитана к регулярной сетке на поверхности источника в баллистическом приближении (рис. 1).

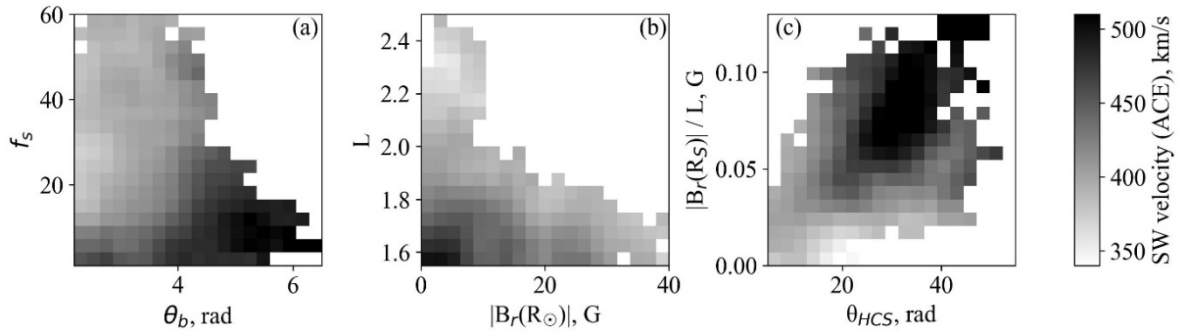


Рис. 1. Сопоставление различных пар параметров магнитного поля с наблюдаемой скоростью СВ (ACE) по данным СТОП (Кисловодск) 2014–2022 гг.

Из сопоставления мы видим, что скорость СВ можно, в целом, описывать различными двухпараметрическими зависимостями. Более длинные силовые линии, основания которых преимущественно лежат на высоких широтах, приносят в плоскость эклиптики относительно слабый ветер. Меньшая напряжённость магнитного поля в основании трубки приводит к более быстрому ветру на поверхности источника, для магнитного поля на поверхности источника зависимость обратная. В областях поверхности источника, сильно удалённых от токового слоя, наблюдается быстрый СВ и наоборот.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между параметрами магнитного поля и наблюдаемой скоростью СВ (OMNI2) по усреднённым за оборот Кэррингтона значениям.

	V_{WSA}	$1/f_s$	θ_b	$1/L$	$ B_r(R_s) $	θ_{HCS}	$ B_r(R_\odot) $
STOP	0.459	0.212	0.529	0.522	0.367	0.396	0.209
SDO/HMI	0.280	0.056	0.418	0.274	0.279	0.155	-0.017
WSO	0.312	-0.033	0.252	0.162	0.212	-0.016	-0.011

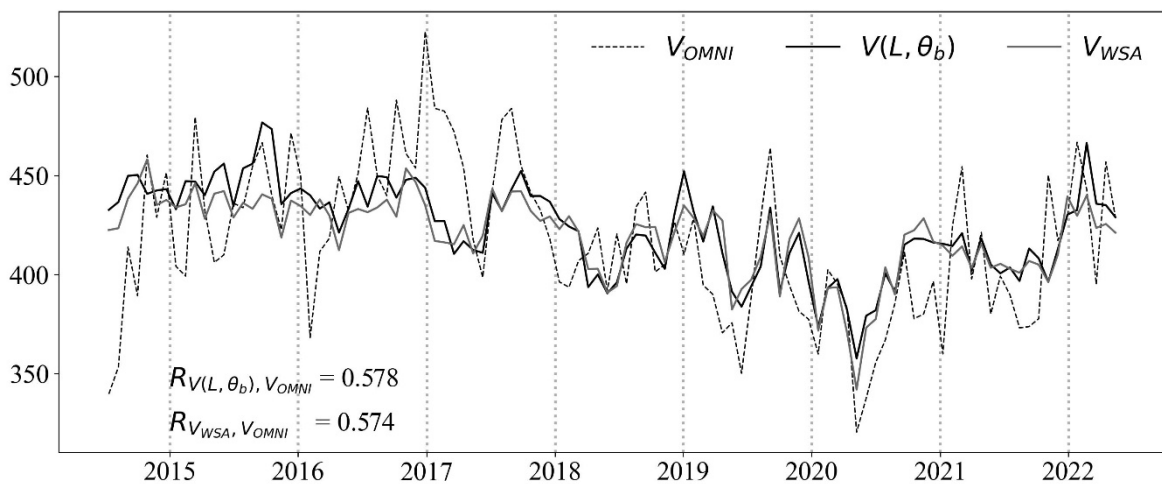


Рис. 2. Пример двухпараметрической зависимости скорости СВ $V(L, \theta_b)$; сравнение с наблюдаемой скоростью V_{OMNI} и со скоростью, вычисленной согласно модели WSA V_{WSA} . Вычисления по усреднённым за оборот параметрам.

Чтобы найти наиболее предпочтительные параметры для моделирования СВ, мы исследовали корреляцию различных параметров с наблюдаемой скоростью СВ (таблица 1). В целом, лучше всего себя показывают параметры θ_b , L , $|B_r(R_s)|$, а хуже всего – ФР, что достаточно неожиданно, так как ФР лежит в основе модели WSA. Таким образом, согласно нашим вычислениям, основную роль в модели WSA играет степень удалённости оснований магнитных трубок от границ КД. Мы предлагаем альтернативное WSA соотношение, которое не включает в себя ФР (рис. 2):

$$V(L, \theta_b) = 265 + \frac{0.00017(6.16 - 7.08 \exp(-0.98\theta_b))^{8.16}}{L^{0.68}}. \quad (2)$$

Коэффициенты соотношения (2) мы определяли, минимизируя отличия между модельными и наблюдаемыми скоростями методом Нелдера – Мида. Такая же процедура оптимизации применялась и для модели WSA (формула 1):

$$V(f_s, \theta_b) = 265 + \frac{0.66}{(1 + f_s)^{-0.04}} (7.2 - 7.0 \exp(-(\theta_b/2.5)^{3.3}))^{2.53}. \quad (3)$$

Не используя ФР, можно добиться корреляции с наблюдениями лучше, чем в рамках стандартной модели WSA. Это говорит о том, что степень расширения магнитных трубок, судя по всему, не является главным определяющим фактором в механизмах формирования СВ.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта 075-03-2022-119/1.

Литература

1. Arge, C.N., Luhmann, J.G., Odstrcil, D., et al. Stream structure and coronal sources of the solar wind during the May 12th, 1997 CME // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 66, 1295–1309 (2004).
2. Poduval, B. Controlling Influence of Magnetic Field on Solar Wind Outflow: An Investigation using Current Sheet Source Surface Model // *The Astrophysical Journal* 827, L6 (2016).
3. Wang, Y.-M. & Sheeley, N.R., Jr. Solar Wind Speed and Coronal Flux-Tube Expansion // *The Astrophysical Journal* 355, 726 (1990).